

# 元素の太陽系存在度と地球存在度

海老原 充 (群馬大学教養部)  
Mitsuru EBIHARA

## 1. はじめに

MASON は 今や古典的名著となりつつある彼の地球化学の教科書 (1966) の冒頭で 地球化学とはいかなるものかを考えた。二人の偉大な地球化学者 クラーク (F. W. CLARKE) とゴールドシュミット (U. M. GOLDSCHMIDT) の言葉を引用しながら 彼は 地球化学の大きな目的の1つが 地球における元素の相対的及び絶対的存在度の決定であると結論した。一見簡単なように見えるこの問題は しかしながらよく考えて見ると 非常な難問である。我々は地球に住んではいるものの 手の届く範囲が極めて限られているからである。地球を卵になぞらえることがよく行われる。地殻が外側の殻で マントルが白味 核が黄味ということになろうか。最近ようやく 白味であるマントルのいろいろな情報が判ってきたとはいうもの。それでも地球化学の対象は地殻や その上にただよう海や川の水圏や気圏であることが圧倒的に多い。ましてや 核は地球化学的研究対象には到底なり得ない。

こうして考えてみると 地球全体をくま無くサンプリングをし それを分析するなど 夢のような話である。もっとも地球が卵のような分化した構造を取らずに 全体が化学組成的に均一であったなら話は簡単であるが そうでないことは今や万人の知るところである。それどころか 少し前までは教科書でお目にかかったクラーク数<sup>1)</sup>なる概念が近頃用いられなくなったのには 手に届く範囲の地球表層部の化学組成すら均一でなく 充分把握できていないという背景がある。このように 地球全体の元素存在度を直接的に求めることは 現在のところ全く無理な相談なのである。

地球化学に対して 宇宙化学という言葉が使われ出して久しい。宇宙化学とは前掲メイスンの教科書によると 宇宙全体における元素の存在と分布に関する科学であるという。宇宙化学にとって対象となる“物”は地

球外物質ということになり 今のところ隕石が主で一部の石や土である。これら対象物はいずれも太陽系内物質であり 太陽系が宇宙全体からすればほんの僅かな存在でしかないことを考えれば 宇宙全体の元素の存在や分布を知るなどということはとてもできない相談だと思われてしまう。そこでここでは宇宙全体などと欲張らず 太陽系を対象を限定して そこでの元素の存在度を考えてみよう<sup>2)</sup>。

では 地球を含めた我が太陽系全体の元素組成は求まるのだろうか? これがこの稿の主題であり 結論を先に言ってしまうと 地球の場合のような困難さは全くといってよい程なく かなり精度良く求め得るのである。どうして地球が無理なのに太陽系全体の元素存在度が求まるのか それはどのような根拠に基づいているのか 求められた値はどの程度の精度と評価されるのか 等々の点について以後順番に考えていくことにしよう。

## 2. 隕石の地位

### 一元素の太陽系存在度を記憶している化石としての一

太陽系の元素存在度を始めて公にしたのは 前記のゴールドシュミットであった。1938年のことである。この存在度を推定するにあたり 彼は2つの情報源を利用し 各元素についてそれぞれ使い分けた。2つの情報源とは 1つは太陽大気から求められた分光学的データであり もう1つは隕石の化学分析値であった。太陽は太陽系全体の質量の99.87%を占めており 太陽の元素組成と太陽系の元素組成は実質的に同一であるとみなして良い。太陽大気のスペクトル分光分析による値が太陽の元素組成を与えてくれるので この情報源を利用するのは妥当である。ではもう1つの情報源 隕石の化学分析値の採用の妥当性はどうか。

隕石の化学分析の歴史は古い。たとえば西洋では19世紀はじめ かの大化学者ベルセリウス(J. J. BERZELIUS)

1) 当初地表面下10マイル (約16 km) 以上の平均化学組成と定義されたが のちに地殻の平均元素存在度あるいは単に元素存在度として用いられ 地殻の概念の変遷とともに混乱をまねいた。

2) 宇宙全体の95%以上の星の組成は 我が太陽のそれと本質的に等しいという報告がある。もしそうだとすれば以下の話で太陽系というところを宇宙と読み替えても事実上同じことになる。



第2表 元素の分類

分類法	分類の根拠	分類例	対応元素
化学的	電子軌道における 電子配置	アルカリ金属元素	Li, Na, K, Rb, Cs
		ハロゲン元素	He, Ne, Ar, Kr, Xe
		希土類元素	La から Lu までの元素
地球化学的	地球の火成活動 に基づく元素の 偏在	親石元素	Na, Mg, Ti, La, Hf, U など
		親鉄元素	Fe, Ni, Co, Ir, Pt, Os など
		親銅元素	Cu, Ag, Zn, Cd など
宇宙化学的	太陽系形成期の 元素の挙動	不揮発性元素	Re, Ir, Os, Pt, La など
		低揮発性元素	Fe, Na, Cu, Zn, Sn など
		高揮発性元素	Cl, Cd, In, Tl, Pb など

1950年代に入って 隕石の分析値の数の増加 質の向上に伴い コンドライト隕石中の不揮発性元素の存在度が極めて似ていることが 一層明らかとなった。それと同時に太陽大気スペクトルの解析の面でも進歩がみられ 分析精度も向上した。こうしてよりよい精度のもとで太陽スペクトルの分析値と隕石の化学分析値の比較がなされた。その結果揮発性の高い元素を除いては両者の分析精度内でお互いの値に大きな差が認められなかった。ここに至って ゴールドシュミットの2つの情報源の取り扱いが正当化され 隕石の地位も同時に保証されたのである。

### 3. 隕石の始原性

1950年終わりから1960年はじめにかけて 宇宙・地球化学的試料の分析法の面で一大革新があった。原子炉中性子を利用した放射化分析法が広く実用に供されたのである。この分析法は原子番号のある程度大きい元素について 分析感度が非常に高いという特長がある。従って微量元素の分析には非常に優れており 隕石などのように貴重な試料には最適の分析法といえる。この分析法を隕石に適用した結果 それまで難かしくて分析が不可能であった元素の分析値が次々に提出された。その結果 隕石の地位をゆるがせる新しい事実が明らかになった。つまりある種のコンドライト隕石のなかにはそれ程揮発性ではない元素が 予想される量よりもずっとわずかしか存在していないことが明らかにされたのである。こうしてそれまで信じられていたコンドライト隕石の一様性がたやすく否定されてしまった。しかし混乱はつかの間であった。分析値の質が向上し、分析元素数と分析されたコンドライト隕石の数が飛躍的に増加した結果 コンドライト隕石の多様性が明確となり

第1図で示されるような詳細な分類がなされるようになった。コンドライト隕石の中の1つのグループ 炭素質 (Carbonaceous 以下Cと略す) コンドライトの中でタイプ1と呼ばれるコンドライト (以下C1コンドライト) は 著しく揮発性なくつかの元素を除いたほとんどすべての元素で その化学組成が太陽大気のと一致することが明らかにされた。コンドライト隕石全体を用いる代わりにC1コンドライトを用いることで 隕石の地位が一層確固たるものになったのである。

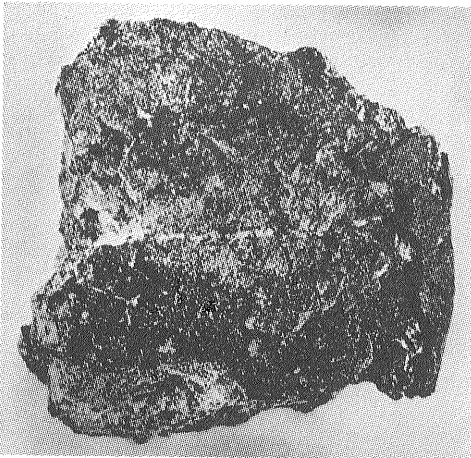
C1コンドライトはコンドライト隕石の中で いやCコンドライトの中でさえ かなり特異な隕石である。C1コンドライトを構成する鉱物の中には含水鉱物が多く  $H_2O$  としての存在が重量%で20%にも及ぶ。またかなり複雑な有機化合物もいくつか見出されていて 生命の起源を研究する上で極めて重要な情報を与えてくれる。現在C1コンドライトと確認されている隕石はわずかに5個しか存在しない。そのうち2つは10g以下しか現存せず 研究対象にはなりにくい。残る3個のうち1938年タンザニアに落ちたイヴナ<sup>3)</sup> (Ivuna) と1806年フランスに落ちたアレイ (Alais) も 現在保有されている量は1kgをはるかに下まわる。残る1個のオルグーユ (Orgueil) 隕石 (第1図) は 1864年にフランスに落下したもので 現在各国の博物館に合合わせて10kg程度保管されている。因に日本でも東京上野の国立科学博物館に日本の隕石と一緒に展示されている。ただ所有権はフランスの国立博物館にあり借用展示であるという。何かの機会に一度御覧になることをお勧めしたい。ある意味では月の石よりはるかに貴重な代物であるのだから。

隕石の最大の特徴はその始原性にあるといわれる。では隕石の始原性とはどういうことを意味するのだろうか。今年の4月24日の某新聞に地球上で最古の岩石が発見されたと報じられた。その年齢42億年。地球の年齢が45.5億ということは良く知られている。つまり地球の年齢——実は太陽系の年齢なのだが——を示す石は地球上には見つかっていないのである。では太陽系の年齢の45.5億年はどこから得られるのかというと 実

3) 隕石名はすべて落下した地域の地名がつく。従ってかなりエキゾチックな名前も多く読み方に苦勞する場合もある。たとえばよく目にする Allende 隕石も日米で呼び方が違う。1969年メキシコに落下したC3コンドライトである。

は隕石の年齢からなのである。以前述べたコンドライト隕石はそのほとんどが年齢として45.5億年を与える。地球上で45.5億年を与える石が見つかっていないのは地球の誕生がそれだけ遅かったのではなく、45.5億前に太陽系の一員として生まれながら、その後の大規模な火成活動による変成の結果、地球誕生期の記憶をすべてかき消して、誕生以来時を刻んでいた時計をリセットしてしまったのである。コンドライトでは時計は途中でリセットすることなく、太陽系が作られて以来、ずっと時を刻んできたということであり、太陽系誕生期の記憶をとどめているということになる。ここに隕石の始原性の本質がある。その始原的なコンドライトの中でもC1コンドライトはとりわけ始原的であるといわれる。

C1コンドライトの特異な始原性を理解するには、我が太陽系の生成過程を知る必要がある。太陽系がどういう経過を経てつくられたかという問題、つまり太陽系起源論は古くはカント(I. KANT)・ラプラス(M. DE LAPLACE)に始まって、以来多くの人々の興味の対象であった。その歴史の変遷をたどってみるのも興味あるところであるが、主題からはずれるのでここでは略すとして、現在一般に受け入れられている考えを紹介しよう。太陽系の原料物質は星間空間を漂っていた星間塵やガスで、星間雲と総称される。いわば塵あくたの類であった。



第1図 オルゲーユ隕石：現在保有されているC1コンドライトの中では最大のもの。写真のかけらは横幅4cmのもので、左中央に見られる白い筋は硫酸マグネシウムである。これはC1コンドライトの母天体上に水が存在していて、それによる変成でできたものと考えられている。

もっともこの塵あくたも少し前までは星を形成していた物質であったのだが。この星間雲に何らかの原因で濃淡が生じてそれまでのつり合いがこわれ、濃い部分が中心となって収縮を開始する。大きくなるにつれて重力も増し、回りの物質を集めて増々大きくなっていった。この雪だるま式に大きくなった中心物質が原始太陽といわれ、やがて今の太陽に落ち着く。そして太陽になりきれずに残った物質から地球を含めた太陽系惑星ができた。この惑星が形成される段階で、星間物質が一度加熱されたと考えられている。そしてこの加熱の度合いは原始太陽からの距離によって異なるとされる。加熱されてガス化した星間物質は温度が下がるにつれてガスから固体の微粒子が凝縮・生成する。この塵が固結集積したものが微惑星といわれる天体となり、これがさらに集まってできた原始惑星を経て現在の惑星となった。隕石は惑星になれなかった、いわゆる落ちこぼれの集団とみなすことができよう。C1コンドライトは其中でも一番の落ちこぼれで、いくつもの元素分別の可能性をきわどくすりぬけて現在まで生き延びてきた原始惑星の生き残りらしいというのである。希ガスや水素、炭素、窒素、酸素などの著しく揮発性の高い元素は引力に打ち勝って逃げてしまったが、それ以外の元素は太陽系の原料となった星間物質、即ち原始太陽星雲そのままの割合でC1コンドライト内に凍結され保存されてきた。

C1コンドライトを化学分析することは、取りも直さず太陽系の元素存在度を分析することになる訳である。ただ分析するといっても現存するC1コンドライトは前述の通り5個、その中で広く分析されているのはオルゲーユ隕石ただ1個という現状を考えると何となく不安がない訳ではない。これで太陽系の元素存在度をあらかじめ決めてしまってもよいものなのだろうか？ それからもう1つ、C1コンドライトはわれわれが手にできる最も変化を受けていない、原始太陽系物質の化石であると考えられていると述べた。でも、最も変化を受けていないらしいというのであって、全然変化を受けていないとは断定できない。C1コンドライトは一体どの程度始原的なのだろうか？ 次の章ではこういう問題を考える上で有力な手がかりを与えてくれる1つの経験則を紹介したい。

4) この星間物質の化学組成が元素組成上、あるいは同位体組成上均一であったかがこの10年来、大問題となっている。最近では10年前までの均一説を修正する必要があることが一般に認められている。しかしそうはいつでも不均一性はほんの僅かなので、実質的には均一の星間物質から太陽系が生まれたと考えるとよい。

### 4. シュースの原子核システマティクス

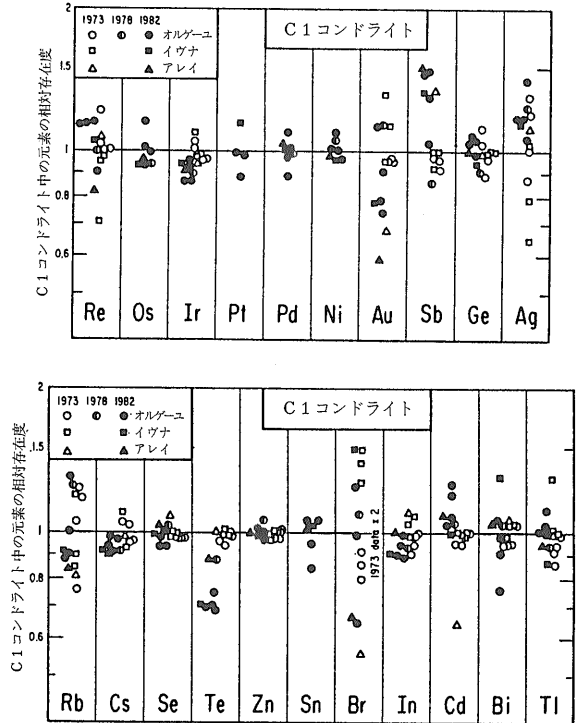
ゴールドシュミットが画期的な元素の太陽系存在度を発表してから約10年後の1947年 シュース (H. E. SUSS) はその当時入手可能な太陽系元素存在度のデータを基にして 次に挙げる4つの規則を見出した。

- (1) 質量数Aが奇数のとき  $A > 50$  の範囲で 各核種の存在度はAの変化に対してなめらかな変化をする。同重体はお互いに加えて対応するAに対して1つの値を求める。
- (2) 質量数Aが偶数のとき Aの変化に対して次の各値がなめらかに変化する：
  - (a)  $A < 90$  のとき 同重体の存在度の和
  - (b)  $A > 90$  のとき  $I = A - 2Z$  (Zは陽子数で原子番号に等しい) で求まる数Iの等しい核種の存在度
- (3)  $A < 70$  では 同重体うちIが大きい方が存在度が小さく  $A > 70$  では小さい方が存在度が大きい
- (4) 中性子数Nがいわゆる魔法数 (magic number) のときには例外的に不規則性が認められる。

2, 3言葉の注釈を加えておくと 質量数Aは陽子数Zと中性子数Nの和  $A = Z + N$  で表わされる。一般にAは元素記号の左肩に 原子番号でもあるZはその下に書かれ ある原子の元素記号をEとするの  $^A_Z E$  のように表わされる。Zが等しくAが異なるもの同士をお互いに同位体であるといふ そのおのおのを核種という。今ではこの核種という言葉の代わりに同位体という言葉が用いられることが多くなった。水素の場合  $^1_1H$  と  $^2_1H (=D)$  (重水素) とは互いに同位体である。各元素は1個以上の同位体からなり 最高はスズ(Sn)で10個の同位体からなる。同重体とは同位体と逆で Aが等しくZが異なるもの同士のことをいう。たとえば  $^{50}_{22}Ti$   $^{50}_{23}V$   $^{50}_{24}Cr$  はそれぞれお互いに同重体である。もう1つ魔法数について、陽子か中性子の数がある特定の数になると その核種の存在度がその前後の核種の存在度と比べて特異的に大きくなる。これはその核種の安定性が例外的に大きいことを意味し この数を魔法数と呼ぶ。

このシュースの見つけた4つの法則は経験則であるが現在でも有効であることがあとで示される。特にこのうち(1)は太陽系の元素存在度を考える上で特に重要であり 後に詳しく考察する。

シュースはユーリー (H. C. UREY) とともに1956年 それまで入手可能な天文学的データや隕石の分析のデータをもとに元素の太陽系存在度を公表した。これが今でもしばしば引用される有名な「シュース・ユーリーの太



第2図 分析された元素と分析値のばらつき：ばらつき具合を示すための基準値 (=1) としては オスmium (Os) パラジウム (Pd) ニッケル (Ni) については文献値白金 (Pt) スズ (Sn) については1982年のデータ それ以外の元素については1972年の分析値の各平均を選んだ。1973年の臭素 (Br) の表示は生のデータの2倍値が示されている。大きくばらつく元素 (金 (Au) やBrなど) と1つにまとまる元素 (セレン (Se) や亜鉛 (Zn)) など元素によってばらつき方が違っている。

陽系元素存在度」である(第3表)。これを完成させるにあたってはシュースの4つの経験則——原子核に関するシステマティクス (nuclear systematics) ——が大いに力を発揮した。この存在度表の発表はセンセーショナルでいろいろな方面に影響を与えた。なかでもパービッジ夫妻 (E. M. & G. R. BURBIDGE) ファウラー (W. A. FOWLER) ホイル (F. HOYLE) (1957) による星の中の元素合成理論 (いわゆる B<sup>2</sup>FH 理論) は 存在度表がもたらした最も大きな成果の1つであった。

### 5. C1コンドライトの化学分析

さてこれからしばらくは筆者が1978年から約3年間滞在していた 米国シカゴ大学での仕事を中心に話をすすめていく。筆者のいたアンダース (E. ANDERS) 研究室では過去2回 C1コンドライトを分析し 報告して

いる。従って筆者らの分析は3度目ということになる。はじめが1973年の報告でオルゲーユ隕石5試料 イヴナ隕石3試料 それにアレイ隕石1試料を分析した。同じ隕石で複数個の試料があるのは試料の入手先が異なるのを別々にし重複して分析したからである。2度目は1978年の報告でオルゲーユ隕石1試料のみ。そして3度目の今回が1982年の報告でオルゲーユ隕石4試料 それにイヴナ アレイ各隕石が1試料ずつであった。3度も繰り返し分析したのはそれなりの訳がある。分析手段が向上して分析可能な元素の数が回を追うごとに増えたことが第1の理由でありはじめの頃の疑わしいと思われた分析値をチェックするというのも大きな理由であった。分析対象となった元素並びに分析値がどの程度ばらついているのかを第2図に示した。生のデータを挙げては煩わしいばかりで面白味がないのでここでは各元素ごとにある値を1としそれに規格化した数値で示してある。また各回ごとの違いも判るように報告年ごとに印を変えて示した。なおこの他に希土類元素グループのなかの6元素も分析されたことをつけ加えておきたい。

第4図の詳しい解釈は細かい話になるので興味のある人には原論文 (EBIHARA et al. 1982) をお読み載くとしてここでは省略するが1つだけ重要な点を指摘しておきたい。それは分析値のバラつきに2つのパターン——すなわちセレン (Se) や亜鉛 (Zn) などのように全分析値があたかもぶどうの房状に1つの値に集まるものと金 (Au) や臭素 (Br) のように分析値が大きく散らばるもの——があることである。どの元素の分析にも測定誤差はありその大きさは元素によっても異なるが5—10%程度と見込んでいる。

上記2つのケースのうち後者の場合そのばらつきの程度はこの誤差をはるかに上回る。もしC1コンドライトがみんな均一な化学組成を持っていたならばどの元素についてもぶどうの房状になるはずである。ところが実際はそうでない。ということは図4はC1コンドライトの組成が不均一であることを示していると解釈してよさそうである。今までもC1コンドライトが不均一であることは岩石学的に明らかにされていた。たとえば図3のオルゲーユ隕石の写真でよく見ると中央に水平な白い筋が認められる。これは硫酸マグネシウムで明らかに水溶液から沈澱したものだという。このようにC1コンドライトはその母天体で水による変成を受けた経験があるらしいと指摘されていた。しかしその根拠となる証拠はいずれも岩石学的なものであり化学的証拠は今まで見つかっていなかった。この水の関与によるC1コンドライトの不均一性という問題 1984年9月号

に対して今回はじめて化学的証拠が提出された。途中の議論を省略して結論だけ言うと Au や Br はキロメートル (km) スケールで またルビジウム (Rb) セシウム (Cs) など約10の元素に関してはセンチメートル (cm) スケールで 水による元素移動があったものと推定されている。

C1コンドライトの不均一性は以上の水が関与するものほかに C1コンドライトができる過程に原因がありそうな不均一性も存在する。詳細はこれも略すがその程度は水によって引き越こされた不均一性に比べるとずっと小さい。ともかくC1コンドライトのかなり徹底的な化学分析の結果 C1コンドライトの不均一性が化学的にも明らかになった。しかしだからといってC1コンドライトの始原性が否定されたことにはならない。C1コンドライトが太陽系の元素存在度を求めるために手にして分析できる唯一の試料であることに変わりはない。あまり悲観する必要はないのである。

それでは次に こうして求められたC1コンドライトの化学分析値をもとにして推定した最新の太陽系元素存在度表の話をしよう。

## 6. 太陽系の元素存在度

これまで太陽系の元素存在度を最もしばしば発表してきたのは米国の天体物理学者キャメロン (A. G. W. CAMERON) である。彼の方針はある程度新しいデータが発表されるとそれをまとめて前回自分の発表した存在度表を改訂するというもので彼の最近の存在度表は1982年に発表された。これは1979年に本稿の冒頭に名前がでた米国スミソニアン博物館のメイスンが発表したデータ集「地球化学のデータ」(Data of Geochemistry)に基づいて推定されたものである。このデータ集は1976年までに発表された各種隕石の化学分析値を集大成したもので大へんな労作である。このデータ集に基づいてキャメロンの表の他に2つの存在度表が1979年別々の著者から公表されている。

こういう状況の下で新しい太陽系の元素存在度を作成する意味はどういうところにあったのか。筆者らの胸のうちには後で列挙するようないわば学問的理由のほかに次のようなどちらかという世俗的理由もあった。つまり折角全元素の1/3に相対する元素について今まで以上に信頼できるC1コンドライトの化学組成を求めたのに他の人にこの値を使われてしまう手はないという。それはともかく“学問的理由”としていくつか新しい存在度表の作成意義を挙げるなら第1に1978年にメイスンが集めたデータの少なくとも倍のデータが入

第3表 太陽系の元素存在度

元 素	Goldschmidt (1937)	Suess & Urey (1956)	Cameron (1982)	Anders & Ebihara (1982)	元 素	Goldschmidt (1937)	Suess & Urey (1956)	Cameron (1982)	Anders & Ebihara (1982)
1H		4.00×10 <sup>10</sup>	2.66×10 <sup>10</sup>	2.72×10 <sup>10</sup>	Ru	3.6	1.49	1.9	1.86
He		3.08×10 <sup>9</sup>	1.8×10 <sup>9</sup>	2.18×10 <sup>9</sup>	Rh	1.3	0.214	0.40	0.344
Li	100	100	60	59.7	Pd	1.8	0.675	1.3	1.39
Be	20	20	1.2	0.78	Ag	3.2	0.26	0.46	0.529
B	24	24	9	24	Cd	2.6	0.89	1.55	1.59
C		3.5×10 <sup>6</sup>	1.11×10 <sup>7</sup>	1.21×10 <sup>7</sup>	In	0.23	0.11	0.19	0.184
N		6.6×10 <sup>6</sup>	2.31×10 <sup>6</sup>	2.48×10 <sup>6</sup>	50Sn	29	1.33	3.7	3.82
O		2.15×10 <sup>7</sup>	1.84×10 <sup>7</sup>	2.01×10 <sup>7</sup>	Sb	0.72	0.246	0.31	0.352
F	1500	1600	780	843	Te	0.2	4.67	6.5	4.91
10Ne		8.6×10 <sup>6</sup>	2.6×10 <sup>6</sup>	3.76×10 <sup>6</sup>	I	1.4	0.80	1.27	0.90
Na	4.4×10 <sup>4</sup>	4.38×10 <sup>4</sup>	6.0×10 <sup>4</sup>	5.70×10 <sup>4</sup>	Xe		4.0	5.84	4.35
Mg	8.7×10 <sup>5</sup>	9.12×10 <sup>5</sup>	1.06×10 <sup>6</sup>	1.075×10 <sup>6</sup>	Cs	0.1	0.456	0.39	0.372
Al	8.8×10 <sup>4</sup>	9.48×10 <sup>4</sup>	8.5×10 <sup>4</sup>	8.49×10 <sup>4</sup>	Ba	8.3	3.66	4.8	4.36
Si	≡10 <sup>6</sup>	≡10 <sup>6</sup>	≡10 <sup>6</sup>	≡10 <sup>6</sup>	La	2.1	2.00	0.37	0.448
P	5800	1.0×10 <sup>4</sup>	6500	1.04×10 <sup>4</sup>	Ce	5.2	2.26	1.2	1.16
S	1.14×10 <sup>5</sup>	3.75×10 <sup>5</sup>	5.0×10 <sup>5</sup>	5.15×10 <sup>5</sup>	Pr	0.96	0.40	0.18	0.174
Cl	4000—6000	8850	4750	5240	60Nd	3.3	1.44	0.79	0.836
Ar		1.4×10 <sup>5</sup>	1.06×10 <sup>5</sup>	1.04×10 <sup>5</sup>	Sm	1.15	0.664	0.24	0.261
K	6900	3160	3500	3770	Eu	0.28	0.187	0.094	0.0972
20Ca	5.71×10 <sup>4</sup>	4.90×10 <sup>4</sup>	6.25×10 <sup>4</sup>	6.11×10 <sup>4</sup>	Gd	1.65	0.684	0.42	0.331
Sc	15	28	31	33.8	Tb	0.52	0.0956	0.076	0.0589
Ti	4700	2440	2400	2400	Dy	2.0	0.556	0.37	0.398
V	130	220	254	295	Ho	0.57	0.118	0.092	0.0875
Cr	1.13×10 <sup>4</sup>	7800	1.27×10 <sup>4</sup>	1.34×10 <sup>4</sup>	Er	1.6	0.316	0.23	0.253
Mn	6600	6850	9300	9510	Tm	0.29	0.0318	0.035	0.0386
Fe	8.9×10 <sup>5</sup>	6.0×10 <sup>5</sup>	9.0×10 <sup>5</sup>	9.00×10 <sup>5</sup>	70Yb	1.5	0.220	0.20	0.243
Co	3500	1800	2200	2250	Lu	0.48	0.050	0.035	0.0369
Ni	4.6×10 <sup>4</sup>	2.74×10 <sup>4</sup>	4.78×10 <sup>4</sup>	4.93×10 <sup>4</sup>	Hf	1.5	0.438	0.17	0.176
Cu	460	212	540	514	Ta	0.40	0.065	0.020	0.0226
30Zn	360	486	1260	1260	W	14.5	0.49	0.30	0.137
Ga	19	11.4	38	37.8	Re	0.12	0.135	0.051	0.0507
Ge	190	50.5	117	118	Os	1.7	1.00	0.69	0.717
As	18	4.0	6.2	6.79	Ir	0.58	0.821	0.72	0.660
Se	15	67.6	67	62.1	Pt	2.9	1.625	1.41	1.37
Br	43	13.4	9.2	11.8	Au	0.27	0.145	0.21	0.186
Kr		51.3	41.3	45.3	80Hg	0.33	0.284	0.21	0.52
Rb	6.8	6.5	6.1	7.09	Tl	0.17	0.108	0.19	0.184
Sr	40	18.9	22.9	23.8	Pb	9.1	0.47	2.6	3.15
Y	9.7	8.9	4.8	4.64	Bi	0.11	0.144	0.14	0.144
40Zr	140	54.5	12	10.7	Th	0.59		0.045	0.0335
Nb	6.9	1.00	0.9	0.71	U	0.23		0.027	0.0090
Mo	9.5	2.42	4.0	2.52					

手可能になったことである。メイスンのとりこぼしとデータ集の締切り後いくつかの重要な分析値が公表されたことによる。第2の理由としてデータ数が増加したことによって分析値の信頼性の判定が可能となり明らかに分析ミスと思われるあやしげな値をはじき出すことができるようになったことがあげられる。第3としてC1コンドライト以外の隕石の分析値も増加してきて各グループごとの元素存在度の個性がはっきりしてくるにつれてたとえばC1コンドライトで値がはっきりしない場合でも他のコンドライトでの分析値から間接的に割り出すことができるようになってきたこと。第4に化学分析値同様天文学あるいは天体物理学的データがここ数年蓄積されてきたことなどなどである。

第3表に今回求められた元素の存在度表(ANDERS & BIHARA, 1982)をキャメロンの1982年の値および歴史的な1938年のゴールドシュミットによる値と1956年のシュースとユーリーによる値と一緒に示した。今回の値でヘリウム(He) ネオン(Ne) アルゴン(Ar) クリプトン(Kr)の希ガス元素および水素(H)炭素(C)窒素(N)酸素(O)の計8元素は隕石の化学分析以外のいわば天体物理学的手法によって求められたものでありそれ以外はC1コンドライトを主体とした隕石の化学分析値から推定したものである。それぞれの値はゴールドシュミット以来のならわしによってケイ素(Si)の存在度を $10^0$ とした場合の相対的な存在度として表わしてある。表中でぬけている元素——43番元素のテクネチウム(Tc) 61番プロメチウム(Pm)それから83番ビスマス(Bi)から92番ウラン(U)までのうち90番トリウム(Th)を除く7元素——は太陽系のもとになった原始太陽系星雲には存在していたはずであるが太陽系の年齢45.5億に比べて充分短かい半減期の核種しか存在しないためその存在度は表中に示されていない。

## 7. 再び隕石の地位について

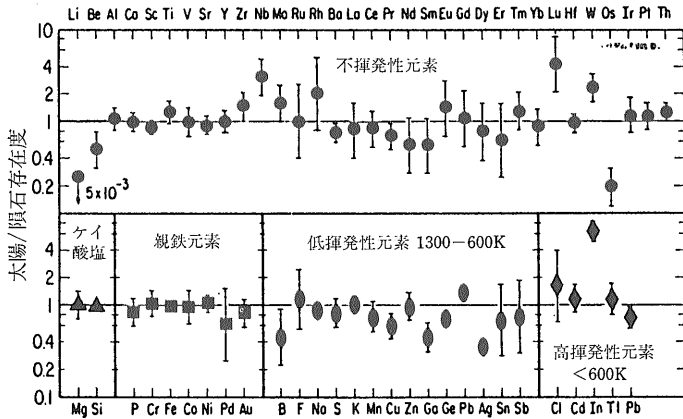
ここでは第3表に示された新しい太陽系存在度をもとに3章の最後に提起しておいたC1コンドライトの始原性の程度という問題を考えてみよう。ここでもしC1コンドライトの始原性が保証されその化学組成を太陽系の組成として採用して妥当であることが明らかになれば3章で危惧の念をいだいた数の上でのC1コンドライトの特殊性や5章で紹介したC1コンドライトの不均一性にもさ程心を悩ませる必要がなくなる。そしてまた隕石の地位も一層安泰なものとなる。2つの別の角度からこのC1コンドライトの始原性の問題を考察し

てみよう。

はじめにC1コンドライトと太陽大気の元素存在度の比較である。結果を第3, 4図に示した。第3図ではC1コンドライトの分析値から求められた元素についてその存在度を1としたときの太陽大気から天体物理学的測定によって求まるデータの変動を示したものである。リチウム(Li)が太陽大気中で著しく欠乏しているほかはわずかに7元素——ニオブ(Nb) ルテチウム(Lu) タングステン(W) オスミウム(Os) ガリウム(Ga) 銀(Ag) インジウム(In) ——を除いて誤差の2倍以内で両者は一致している。この7つの元素に共通しているのはいづれも太陽大気スペクトルの解析が難しいことで分析精度が悪いため分析者によってはこれら7元素を除いてしまうこともある。図では元素を5つのグループに分類してある。これは表2で示した元素の分類の種類でいうと宇宙および地球化学的分類によるものである。この5つのグループでどの場合も太陽大気存在度と隕石存在度の間に明瞭な差が認められない。第4図ではC1コンドライトの分析値と太陽大気分析値を各元素について直接比較したものである。ほとんどの元素が $45^\circ$ の直線上に乗っておりしかも元素存在度において $10^0$ の変動にまたがって強い直線性を示している。このことからC1コンドライト主体で求められた元素の存在度は太陽の元素組成に等しく従って太陽系の元素組成と一致すると結論される。ついでながら隕石から推定された太陽系の元素存在度と太陽大気スペクトルから求められる存在度との間の差は年を追うごとに縮まってきた。今後太陽大気スペクトルの分光学的解析技術がさらに向上すれば上記の7元素を含めて両者の値はますます一致する方向に進むことが期待される。

もう1つの検討法は4章で述べたシュースのシステムティックスの第1項に基づくものである。第1項はこうであった：質量数Aが奇数のときAが50より大きい範囲で各種類の存在度はAの変化に対してスムーズな変化をする。同重体は加えて扱う。第3図と各元素の同位体組成から各核種の太陽系存在度が計算できる。そうして求めた各核種の存在度のなかから質量数Aが奇数の核種だけを選び出してその存在度を質量数Aの順番にプロットしたのが第5図( $70 < A < 140$ )であり第6図( $140 < A < 210$ )である。実線で結ばれているものは同じ元素に所属する核種即ちお互いに同位体の関係にあるもので勾配は同位体比の測定からかなり精密に決定できる。また5ヶ所たとえばRb+Sr<sup>87</sup>のように表示されているものはA=87では<sup>87</sup>Rbと<sup>87</sup>Srが同重体の関係にあり両方の寄与があることを表わし



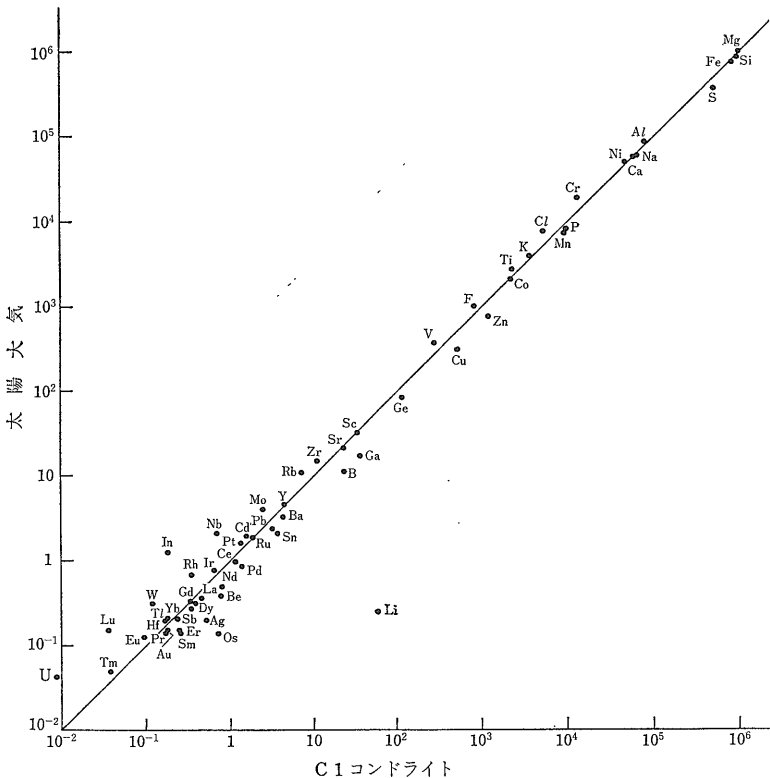


第3図 C1コンドライトと太陽大気のエレメント存在度の比較(1):リチウム(Li)を除いてわずか7元素(本文参照)が誤差の2倍を越えて不一致を示すにすぎない。これらはいずれも太陽大気中の存在度が求め難い元素である。この図では元素を宇宙化学的分類によって分けて各グループごとに比較しているがどのグループでも両者の存在度の間に差がない。

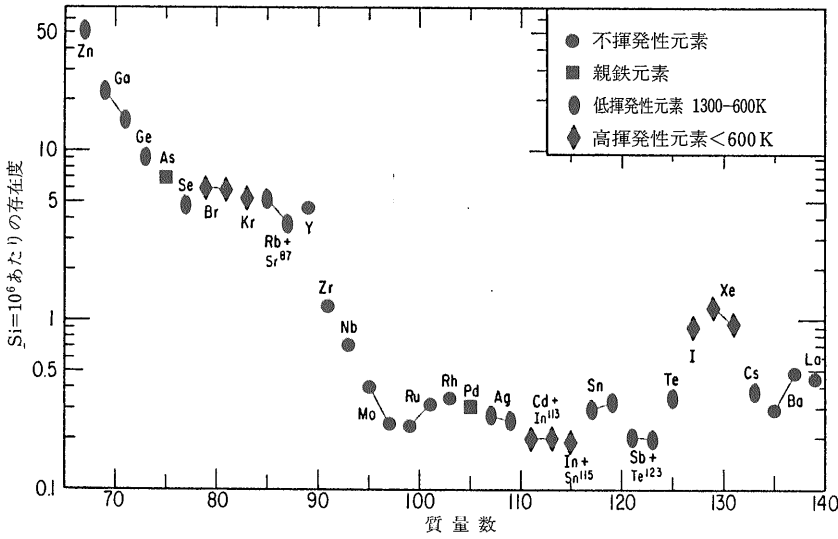
ている。第5図でイットリウム(Y) やスズ(Sn) で不連続が生じていて それぞれ予想される存在度より大きい値をとるのは シューズのシステムティック第4項の魔法数によるもので Yでは N=50 Snでは Z=50 がそれに相当する。これら魔法数で説明のできない不連続性が認められるのは 第5図では銀(Ag)ーカドミウム(Cd) 第6図ではサマリウム(Sm)ーユーロピウム(Eu)のわずか2ヶ所であとは驚く程なめらかな変化を示している。この2つの不連続のうち 前者のAg-Cdの場合 Agの分析データが高すぎるという疑いがも

たれている。近い将来訂正されることが期待される。もう一方のSm-Euの不連続性はEuの存在度が予想されるより高い存在度をとることによりもたらされたものである。この場合は分析上の問題というより こういう不連続性が本来的に隕石内に内包されていた可能性が高い。隕石がつくられるもとなった原始惑星星雲での何らかの出来事を反映しているのかも知れず 今後の研究課題として残されている。

以上2つの検討法により C1コンドライトがどの程



第4図 C1コンドライトと太陽大気のエレメント存在度の比較(2):それぞれの存在度を Si=10<sup>6</sup>で規格化して示したもので、10<sup>-2</sup>から10<sup>6</sup>まで 10<sup>6</sup>の存在度の開きのある元素間できれいな45°の直線性が得られる。第3図とともにC1コンドライトの元素組成は極度に揮発性なくつかの元素を除いては 太陽大気のエレメント組成と等しいと結論できる。C1コンドライトが太陽系の元素存在度を与える根拠となる図といえる。

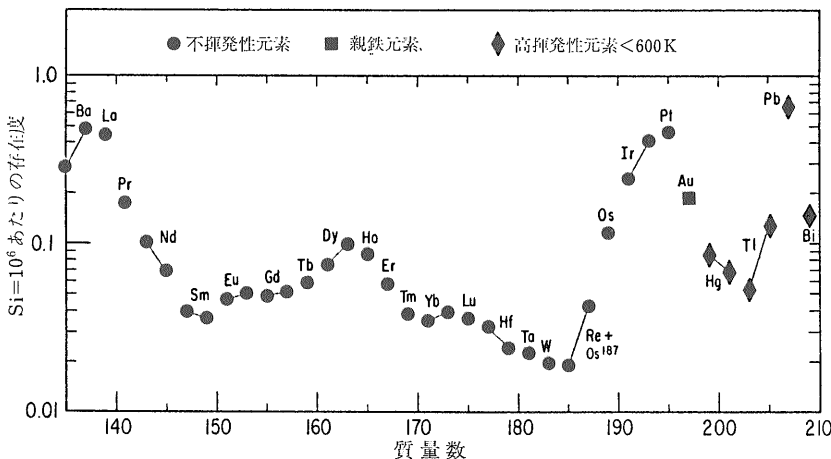


第5図 質量数70から140までの奇数番号核種の存在度：シュースの nuclear Systematics 第一項に基づく。イットリウム (Y) とスズ (Sn) を除いて唯一不連続性の認められるのは銀 (Ag) - カドミウム (Cd) 間でそれ以外はなめらかな曲線で結ばれる。Y と Sn の不連続性は  $n=50$  の魔法数が関与するものである。Ag-Cd の不連続性は Ag のデータに問題があるらしい。実線で結ばれているのはお互いに同位体の関係にあるものどうして その勾配は同位体比の測定によりかなり精度よく求められている。(+)印は同重体の関係にある核種どうしの存在度を加えていることを示す。

度原始的であるかお判り載いたことと思う。C1コンドライトの化学組成が太陽の組成 ひいては原始惑星雲の化学組成と事実上同一と考えて何ら差し障りがないことが示された。C1コンドライトの数が少ないことも不均一性があることもほとんど問題とするにはあたらない。現在の段階で原始太陽系物質とC1コンドライトの元素存在度の差を推定してみるなら 太陽大気のスเปクトル分析の精度がC1コンドライトの化学分析に比べて相当悪いので図3や4をもとにすることは難かしいが 第5-6図から判断して 両者の差は10%以内と見つもられよう。この値は今までの経緯からして今後ますます小さい値となっていくことが期待される。

### 8. 地球の元素存在度

おわりに こうして求められた太陽系の存在度をもとにして 地球の元素存在を求める試みの1つ (MORGAN & ANDERS 1980) を紹介してこの稿を閉じたい。はじめにも述べた様に直接的手段によって つまりC1コンドライトのようなある対象物質を化学分析することによって地球の元素存在度を求めることは現在のところ不可能である。それではどのようにしたらよいかというとまず地球がどういう過程で生まれたかというモデルを設定する。従来このようなモデルは多分に直観的であった。地球をはじめとする惑星は単一の隕石が複数の種類の違う隕石の混合物から作られたとする。どちらにするかというのは 密度やその他の惑星のもつ諸性質に



第6図 質量数140から210までの奇数番号核種の存在度：図5のつづき。この領域で不連続が認められるのはサマリウム (Sm) - ユロピウム (Eu) 1ヶ所のみであとはスムーズな変化を示す。Sm-Eu不連続性の原因は Eu の存在度が高いことによる。これは分析上の問題というよりも C1コンドライトに本来的に内包されていたと見た方が妥当で その原因や意味するところについては今後の研究を待たねばならない。

第4表 地球 金星 水星の元素存在度

元 素	宇宙存在度	地 球	金 星	水 星	元 素	宇宙存在度	地 球	金 星	水 星
1H	2.72×10 <sup>10</sup>	6100	6200	160	Ru	1.86	2.2	2.3	3.6
He*	2.18×10 <sup>9</sup>	110	1.1×10 <sup>4</sup>	—	Rh	0.344	0.46	0.46	0.75
Li	59.7	50	50	50	Pd	1.39	1.6	1.5	6.7
Be	0.78	0.93	0.93	1.5	Ag	0.529	0.076	0.081	0.027
B	24	0.17	0.16	0.0041	Cd	1.59	0.027	0.027	6.7×10 <sup>-4</sup>
C	1.2×10 <sup>7</sup>	6900	6900	170	In	0.184	0.0035	0.0035	8.3×10 <sup>-5</sup>
N	2.48×10 <sup>6</sup>	54	55	1.3	<sup>50</sup> Sn	3.82	0.61	0.64	0.21
O	2.01×10 <sup>7</sup>	3.5×10 <sup>6</sup>	3.4×10 <sup>6</sup>	3.6×10 <sup>6</sup>	Sb	0.352	0.053	0.057	0.019
F	843	130	140	46	Te	4.91	2.2	1.2	0.38
<sup>10</sup> Ne*	3.76×10 <sup>6</sup>	0.5	49	—	I	0.90	0.020	0.020	5.0×10 <sup>-4</sup>
Na	5.70×10 <sup>4</sup>	1.0×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>4</sup>	3500	Xe*	4.35	0.017	1.6	—
Mg	1.075×10 <sup>6</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>	Cs	0.372	0.021	0.023	0.0035
Al	8.49×10 <sup>4</sup>	9.7×10 <sup>4</sup>	9.8×10 <sup>4</sup>	1.6×10 <sup>5</sup>	Ba	4.36	5.4	5.4	9.0
Si	≒10 <sup>6</sup>	≒10 <sup>6</sup>	≒10 <sup>6</sup>	≒10 <sup>6</sup>	La	0.448	0.51	0.51	0.83
P	1.04×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>4</sup>	1.1×10 <sup>4</sup>	5000	Ce	1.16	1.3	1.3	2.2
S	5.15×10 <sup>5</sup>	1.7×10 <sup>5</sup>	9.0×10 <sup>4</sup>	3.0×10 <sup>4</sup>	Pr	0.174	0.17	0.17	0.28
Cl	5240	104	104	2.6	<sup>60</sup> Nd	0.836	0.89	0.89	1.5
Ar*	1.04×10 <sup>5</sup>	2.2	210	—	Sm	0.261	0.26	0.26	0.42
K	3770	640	680	220	Eu	0.0972	0.097	0.097	0.16
<sup>20</sup> Ca	6.11×10 <sup>4</sup>	7.1×10 <sup>4</sup>	7.1×10 <sup>4</sup>	1.2×10 <sup>5</sup>	Gd	0.331	0.34	0.34	0.56
Sc	33.8	40	40	66	Tb	0.0589	0.063	0.063	0.10
Ti	2400	3200	3200	5200	Dy	0.398	0.42	0.42	0.69
V	295	300	300	490	Ho	0.0875	0.090	0.090	0.147
Cr	1.34×10 <sup>4</sup>	1.5×10 <sup>4</sup>	1.4×10 <sup>4</sup>	5.5×10 <sup>4</sup>	Er	0.253	0.26	0.26	0.42
Mn	9510	2500	1500	1100	Tm	0.0386	0.039	0.039	0.064
Fe	9.00×10 <sup>5</sup>	1.1×10 <sup>6</sup>	9.9×10 <sup>5</sup>	4.6×10 <sup>6</sup>	<sup>70</sup> Yb	0.243	0.25	0.25	0.41
Co	2250	2600	2400	1.1×10 <sup>4</sup>	Lu	0.0369	0.041	0.041	0.068
Ni	4.93×10 <sup>4</sup>	5.8×10 <sup>4</sup>	5.4×10 <sup>4</sup>	3.5×10 <sup>5</sup>	Hf	0.176	0.24	0.24	0.39
Cu	514	91	98	32	Ta	0.0226	0.024	0.024	0.039
<sup>30</sup> Zn	1260	210	220	74	W	0.137	0.18	0.18	0.30
Ga	37.8	8.3	8.7	2.9	Re	0.0507	0.060	0.061	0.099
Ge	118	19	21	6.8	Os	0.717	0.86	0.86	0.96
As	6.79	7.3	7.3	34	Ir	0.660	0.81	0.82	1.4
Se	62.1	23	12	4.0	Pt	1.37	1.6	1.6	2.6
Br	11.8	0.25	0.25	0.0060	Au	0.186	0.24	0.23	1.0
Kr*	45.3	0.024	2.3	—	<sup>80</sup> Hg	0.52	0.0073	0.0074	1.8×10 <sup>-4</sup>
Rb	7.09	1.0	1.1	0.35	Tl	0.184	0.0035	0.0035	8.6×10 <sup>-5</sup>
Sr	23.8	31	31	5.0	Pb**	0.0612	0.0014	0.0014	3.5×10 <sup>-5</sup>
Y	4.64	5.5	5.5	9.0	Bi	0.144	0.0026	0.0026	6.5×10 <sup>-5</sup>
<sup>40</sup> Zr	10.7	15	15	24	Th	0.0335	0.041	0.041	0.068
Nb	0.71	1.6	1.6	2.6	U	0.0090	0.011	0.011	0.019
Mo	2.52	4.6	4.6	7.5					

\* 地球 金星 水星における希ガスの存在度は濃度単位 (10<sup>-8</sup>cm<sup>3</sup>/g) で示されている。

\*\* 放射性元素からの寄与のない <sup>204</sup>Pb の値。

合うように決める。こうして得られた結果は一見もつもらしいのだが任意性に富んでいてあまりスマートとはいえない。これから紹介するシカゴ大学のアンダースらによるアプローチはそういう「あいまいさ」を極力除こうとしたもので、そういう意味では科学的と言えるのかも知れない。

アンダースらをとった基本的な仮定は「地球を含めたいわゆる惑星はコンドライトと同じようなプロセスで作られた」というものであった。ではコンドライトができる過程はどの程度知られているのか？ この問題は1968年から70年のはじめにかけてアンダース ラリマー (J. W. LARIMER) グロスマン (L. GROSSMAN) といったいわゆるシカゴグループによってかなり積極的な解明がなされた。その結果「凝縮モデル」や「二成分混合モデル」として集大成された。今のところこうしたモデルは誰もが皆何の疑いもなく信じている訳ではないが、大筋においては認めている人が多い。コンドライトを含めた惑星物質は熱いガスから温度が下がるにつれて凝縮してきたということは再三述べた。このとき熱力学的平衡を仮定すると大きく分けて次の3つの物質が順に凝縮する：(1)カルシウム (Ca) やアルミニウム (Al) その他不揮発性元素 (表2参照) に富んだ初期凝縮物 (2)鉄 (Fe) ニッケル (Ni) コバルト (Co) からなる金属合金 (3)マグネシウム (Mg) ケイ酸塩。温度がかなり下ると金属やケイ酸塩は揮発性元素を取り込む。そして金属は一部硫化水素 ( $H_2S$ ) と反応して硫化鉄 (Fes) を生じる。コンドライトから判断するとこうした凝縮したばかりのいわば原始的な凝縮物のはじめの星雲のもつ宇宙存在度比をとっているわけではなく、星雲中での物理的過程でかなりの分化をうけてきている。この分化の過程は今のところよく判っていない。上記凝縮物が集積することによって惑星のもとになる原始惑星がつくられるわけであるが、この集積過程の直前に短期間ではあるが凝縮物質が一度熱せられて一部融解した。コンドライトを特徴づけるミクメーターサイズのコンドリユールはこの過程によってつくられたと考えられている。この過程によりさらに2つの成分——再熔融した金属と再熔融したケイ酸塩が——つけ加わる。以上合計6つの成分にもう1つ揮発性成分が加わる。これは極度に揮発的な19元素からなり、さらにその性質の違いから本来いくつかのグループに分けられるべきだが、取り扱いが複雑で面倒になるので同1成分とされた。

さてこれから地球の組成を求めるのだが、ここでまた1つ次のような仮定を導入する：全元素は以上の7つの成分のどれかに所属し、その成分内では相互に分別せず

宇宙存在度と同じ比率で存在する。この仮定は厳密に成立することを期待するのは無理としても、近似的には認めてもよさそうである。こういう仮定のもとでは地球の83元素の存在度を各々求める代わりにわずか7元素つまり各成分の代表1元素ずつで7成分で7元素の存在度を求めればよい。たとえばウラン (U) の存在度を求めれば、Uの所属する不揮発性元素の他の37元素の存在度が自動的に計算できる。途中の込み入った話は省略して求められた結果を示したのが第4表である。ここには地球の元素組成の他、水星と金星の元素組成、それに参考のために第3表で示した太陽系元素組成を示した。水星と金星の値は地球のそれに比べると不確かさが大きい。どちらも無人探査衛星による観測データをもとにした値である。こうした物理的方法によって得られた値からどうして惑星の組成が決まるかというのも興味ある話だが、紙面の都合もあるしここではこれ以上ふれない。

これらの値はあくまでシカゴグループ流のモデルに依存した元素存在度であって、こういう考えをとらない人たちにとっては全く根拠のない数値となる。またこのモデルを認めたとしても第4表であげた数値は金星、水星については無論のことながら地球についての元素存在度にしても最終的なものというには程遠い。7章で示されたように、太陽系の元素存在度が今や10%の精度で求まっている現実と比較すると格段の差がある。地球に住んでいながら地球の元素存在度を求めるのが難しく、太陽系存在度を通して間接的に求められるというのは、何とも奇妙な話である。しかしこうした状況が地球の元素存在度に関する現状なのである。

## 文 献

- (1) ANDERS, E. and EBIHARA, M. (1982): Solar-System abundance of the elements, *Geochim. Cosmochim. Acta* v. 46, p. 2363-2380.
- (2) BURBIDGE, E. M., BURBIDGE, G. R., FOWLER, W. A., and HOYLE, F. (1957): Synthesis of the elements in stars, *Rev. Mod. Phys.* v. 29, p. 547-650.
- (3) 地質調査所地球化学課 (1982): 地質調査所における地球化学の歴史と展望。地質ニュース no. 337 p. 146-152.
- (4) EBIHARA, M., WOIF, R. and ANDERS, E. (1982): Are CI chondrites chemically fractionated? A trace element study, *Geochim. Cosmochim. Acta* v. 46, p. 1849-1861.
- (5) MASON, B. (1966): *Principles of Geochemistry* 3rd edn. (邦訳「一般地球化学」松井・一國訳, 岩波書店).
- (6) MASON, B. (1979): *Cosmochemistry. Part 1. Meteorites.* In *Data of Geochemistry*, 6th edn. (ed. M. Fleischer), Geol. Survey Prof. Paper 440-B-1, U.S. Govt. Print. Off.
- (7) MORGAN, J. W. and ANDERS, E. (1980): Chemical Composition of Earth, Venus, and Mercury. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* no. 77, p. 6973-6977.